

# 爐氣碳勢對碳工具鋼熱處理性質的影響

## Effect of Carbon Potential of the atmosphere on the Heat Treatment

### Properties of Carbon Tool Steel

鄭文彬\* 華子傑\* 陳永傳\*

W.P. Cheng T.C. Hua Y.C. Chen

#### 摘要

本實驗旨在探討爐氣碳勢對工件的機械性質之影響。將高碳工具鋼薄工件置於不同碳勢的爐氣中，加熱至 810°C 施以沃斯田鐵化，保溫 17 分鐘後淬火，再施以 330°C 及 400°C 回火，以瞭解爐氣碳勢對工件熱處理後之硬度及韌性的影響，期能針對特定的工件找出最適宜的爐氣碳勢，使其熱處理後具有最佳的機械性質。實驗的結果顯示，高碳工具鋼薄工件於較高碳勢的爐氣中加熱淬火後，其抵抗回火軟化的能力較佳，但韌性較差；而於較低碳勢的爐氣中加熱淬火後，其抵抗回火軟化的能力較差，但韌性較佳。熱處理時最佳的爐氣碳勢為 0.70%~0.80%，工件在此碳勢的爐氣中加熱淬火，並回火到相同的硬度時，可得到最佳的韌性。當爐氣的碳勢一定時，若回火到相同的硬度值，則採用 330°C 回火比採用 400°C 回火可得到較佳的韌性。

關鍵詞:高碳工具鋼、硬度、韌性

#### Abstract

The purpose of the present experiment is to investigate the effect of the carbon potential of furnace atmospheres on the mechanical properties of workpiece. The workpiece of high carbon tool steel was austenitized at 810°C for 17 min in the atmosphere with various carbon potential before quenching, and then tempered at 330°C or 400°C. The effects of carbon potential of the atmosphere on the hardness and toughness of the workpiece were studied. The results show that the thin workpiece of high carbon tool steel which has been heated in the atmosphere with a higher carbon potential before quenching will possess a higher hardness and a lower toughness after tempering. Whereas for the workpiece heated in the atmosphere with a lower carbon potential, its hardness will decrease fast during tempering, but its toughness gets better. Additionally, for the thin workpiece of high carbon tool steel quenched and tempered to a given hardness value, those tempered at 330°C are tougher than those tempered at 400°C. Furthermore, the workpiece will possess the best toughness at the same hardness level when the carbon potential of the atmosphere is between 0.70% and 0.80%..

**Keywords:** High carbon tool steel, Hardness, Toughness.

\*國立台灣大學機械工程學研究所

#### 1. 前言

一般工件實施淬火時，需在爐氣中加熱，若爐氣的碳勢超過工件本身的含碳量時，則工件表層會發生滲碳反應，雖然可提高耐磨性，但是韌性也隨之降低；反之，當爐氣的碳勢比加熱鋼料的含碳量低時，則工件會發生脫碳，甚至表面形成一層氧化膜，使得硬度值降低，耐磨性也不佳，達不到熱處理的效果。可見爐氣的碳勢控制與工件熱處理後的機械性質息息相關。

工業上所使用的爐氣種類繁多，其中木精分解氣是目前工業界應用相當廣泛的一種爐氣。可用來實施鋼料的滲碳、中性加熱及滲碳氮化等，對於不同的機械零件，所使用的爐氣碳勢也不盡相同，而經由熱處理後對其機械性質影響甚大，故業者必須從多種角度來衡量，選用最佳碳勢之爐氣，才能使熱處理後的工件具有最佳的機械性質。本文的主要目的在研究木精分解氣的碳勢對工件機械性質的影響，以提供業界參考。

#### 2. 實驗方法與步驟

##### 2.1 實驗規劃

本實驗以各種碳勢的木精分解氣來進行高碳工具鋼薄工件的淬火回火處理，利用硬度試驗機、薄板彎斷器分別測試工件的硬度及韌性，並且觀察表層的顯微組織，以明白爐氣碳勢對高碳工具鋼薄工件之機械性質的影響。實驗流程如第 1 圖所示。

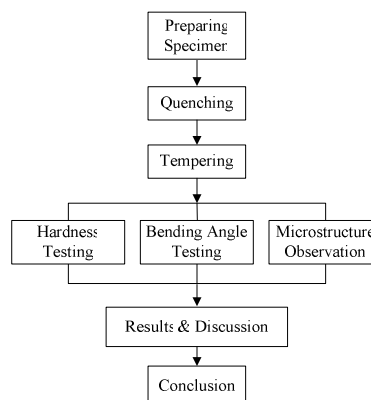


Fig. 1. The process of this experiment

##### 2.2 試片成份與規格

本實驗所使用的高碳工具鋼薄工件，厚度只有 0.40mm，試片尺寸 11×3×0.40mm，在經過熱處理前為

球化組織。除 Cr 含量較高外，其化學組成與 SK4 鋼料相似，如第 1 表所示。

Table 1. Chemical composition of the highcarbon tool steel workpiece.

Elements (wt%)							
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.931	0.163	0.532	0.006	0.001	0.030	0.310	bal

## 2.3 熱處理

### 2.3.1 碳勢控制

本實驗淬火時所採用的爐氣為木精分解氣，並添加適當的 CO<sub>2</sub> 來控制實驗所需的碳勢，而木精分解溫度固定設為 950°C，分解氣流量為 140ml/min，再配合氧氣感測計、PID 控制器及氣體質量控制器組成的碳勢控制系統來控制碳勢。當改變 CO<sub>2</sub> 的流量時，氧氣感測計可馬上反應出電動勢，利用此系統來了解爐氣是否達到穩定。將木精分解氣和少量 CO<sub>2</sub> 通過混氣瓶混合均勻後，分別通入氧氣感測爐及試片加熱爐，形成 N<sub>2</sub>-CO-H<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-CH<sub>4</sub> 型爐氣<sup>(1)</sup>，靜待一小時後，再以薄鋼片檢測爐氣碳勢，若爐氣達到所預定的碳勢時，試片即可進行淬火加熱。

### 2.3.2 鹽浴回火處理

為了改善淬火鋼的延韌性，將淬火鋼加熱至適當溫度保持一段時間，以消除淬火後所產生的內應力，調整硬度及組織而得到適當的強韌性。本實驗採用鹽浴進行回火，不但利用攪拌器使液態鹽上下流動，以達到溫度均勻之目的，並且利用適當的夾具，來矯正薄板狀工件經淬火後所產生的變形。

本實驗預計將高碳工具鋼薄工件的硬度調整在 670~720HV，以研究在相同的回火條件下，爐氣碳勢的高低對於工件回火後硬度及韌性的影響，並將回火溫度設定為 330°C 及 400°C，探討低溫長時間及高溫短時間的回火效果。除此之外，也選定適當的硬度範圍，比較出工件在何種爐氣碳勢下經淬火回火後，可以得到最佳的機械性質。

## 2.4 熱處理後的試驗與分析

### 2.4.1 硬度試驗

因高碳工具鋼薄工件厚度只有 0.4mm，故採用洛氏表面硬度(Rockwell Superficial Hardness)試驗機量測硬度，使用之尺度為 HR15N，測定硬度時先加小荷重(Minor Load)3kgf，其次再加上大荷重 12kgf，把金剛石壓痕器壓入試片，然後除去大荷重只留下小荷重，而以加大荷重時所產生的永久變形部份的深度 h (μm)來比較硬度的大小。硬度值計算公式為 HR15N = 100 - h，再經由硬度換算表而得到本實驗所使用之 HV 硬度值。

### 2.4.2 韌性試驗

欲得知材料的韌性，一般需先將材料依規範製成預定尺寸之衝擊試片，裝設於衝擊試驗機後，利用擺錘對試片施以撞擊力，使它破斷，而從試片破壞時所吸收的能量來表示韌性的大小。但對於薄板試片來說，其韌性之大小與其所能彎曲的角度大小有關，因此只要將薄板試片沿著固定曲率半徑來進行彎曲，就可以判斷出此薄板試片韌性之好壞。以韌性較佳來說，需要彎曲到較大的角度時才會破斷，甚至彎曲到 180 度還不會斷，而韌性差者，稍微彎曲小角度就會破斷。本實驗所使用薄板試片的厚度大小為固定，並且將每一試片沿著一定曲率半徑的圓柱面來進行彎曲，以彎斷角度來判斷薄板的韌性之好壞<sup>(2)</sup>。

## 3. 結果與討論

### 3.1 淬火後的硬度及顯微組織

第 2 圖為高碳工具鋼薄工件在不同碳勢的爐氣中加熱淬火後，其硬度與爐氣碳勢的關係。由圖可知，當爐氣碳勢為 0.48% 時，淬火平均硬度為 746HV(取 10 個試片測硬度)；當爐氣碳勢為 0.69% 時，淬火硬度值為 810HV，當爐氣碳勢為 0.79%、0.88%、0.97% 時，淬火硬度值幾乎保持不變，維持在 814HV 左右；當爐氣碳勢為 1.47% 時，淬火硬度值為 812HV，稍有下降，但是並沒有很明顯。由此可知，若鋼料於較低碳勢的爐氣中進行加熱，表層會發生脫碳反應，經淬火後會有硬度偏低的傾向。反之，若鋼料在極高碳勢的爐氣中加熱淬火後，殘留沃斯田鐵會偏多，故硬度也有下降的趨勢。

第 3 圖是高碳工具鋼薄工件在不同碳勢的爐氣中加熱經淬火後，以光學顯微鏡觀察到的表層顯微組織，主要為麻田散鐵及未固溶的碳化物。在爐氣碳勢為 1.47% 時，爐氣碳勢大於鋼料本身的含碳量，除了薄工件本身的球狀碳化物較不易溶入於基體中，表層也會發生滲碳反應，因此相較於爐氣碳勢為 0.69% 及 0.48%，所觀察到的顯微組織是散佈著較大及較多顆粒狀的碳化物。

### 3.2 回火溫度與時間對硬度及韌性的影響

經淬火後的鋼料雖然硬度高，但往往過於硬脆而無法使用，為了提高其韌性，則必須進行回火處理，藉由控制回火的溫度及時間，將鋼料調整至我們所需的機械性質。

本實驗的回火溫度採用 330°C 及 400°C，以探討在此兩種不同溫度之下，將鋼料調整至大約相同的硬度來比較其韌性之大小。由第 4 圖可知，當爐氣碳勢為 1.47% 時，可看出在相同硬度下 330°C 回火的彎斷角度較大(韌性較佳)，整條曲線位於 400°C 回火的右上方；當碳勢為 0.97%、0.79%、0.69% 時，也是 330°C 回火的彎斷角度較大，這兩條曲線相較起來，330°C 曲線比 400°C 曲線較靠右上方。此表示當回火到相同硬度時，在 330°C 回火者比在 400°C 回火者具有較大的韌性；當回火到相同的韌性時，在 330°C 回火者比在 400°C 回火

者具有較高的硬度。

此種現象與碳化物析出的大小及數量多寡有關。在 300°C 附近的回火時， $\epsilon$ -碳化物開始轉變形成  $Fe_3C$ ，而此初期之  $Fe_3C$  會以薄板狀的形態析出於粒界或麻田散鐵葉片的晶面上，但數量並不多，直至回火溫度為 400°C 左右時，才完成回火的第三過程。而於 400°C 之回火，淬火組織中殘留於麻田散鐵間的沃斯田鐵在熱力學上及機械上是不安定的組織，除了會發生熱分解而析出  $Fe_3C$  之外，殘餘未變態的沃斯田鐵也會因碳化物的析出，其含碳量降低，造成機械上的不穩定。當受到應力產生應變時會誘起變態成為麻田散鐵，如此所生成的薄板狀  $Fe_3C$  和麻田散鐵，可能是於 400°C 回火時韌性較差的主因<sup>(3-6)</sup>。

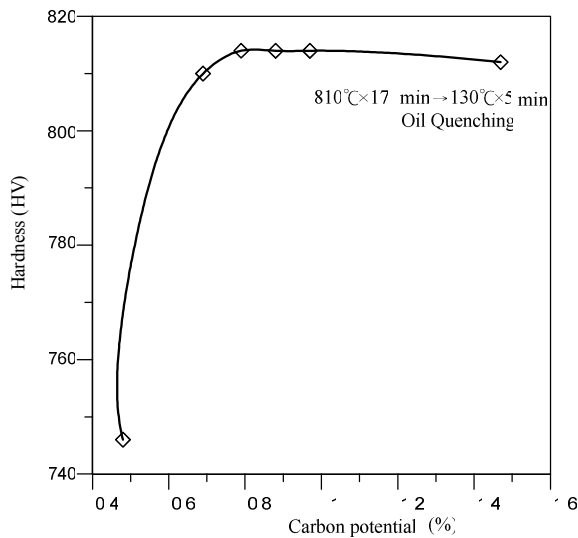


Fig. 2. Surface hardness of quenched high carbon tool steel workpiece as a function of carbon potential.

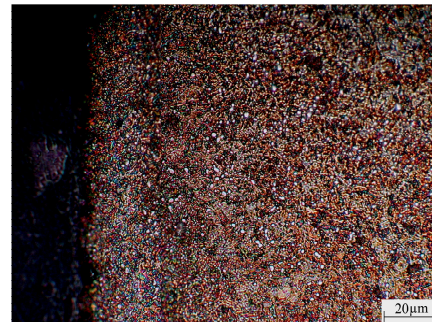
### 3.3 碳勢對硬度及韌性的影響

換另一角度來看，將高碳鋼薄工件在不同碳勢的爐氣中加熱淬火後，分別在 330°C 回火 75 秒、90 秒、105 秒及 120 秒；在 400°C 回火 40 秒、45 秒、50 秒及 55 秒，之後測試其硬度及彎斷角度，所得結果如第 5、6 圖所示。由第 5 圖可看出，在溫度 330°C 及時間 75 秒的回火條件下，當碳勢為 1.47% 時，硬度值可高達 725HV 左右，但其彎斷角度值僅有 26 度而已；當碳勢為 0.69% 時，硬度值為 693HV，彎斷角度值為 47 度。顯現出在爐氣碳勢較低的條件下，其抵抗回火軟化的能力較差，但可使韌性提高。隨著回火時間的增長，當碳勢為 1.47% 經 120 秒回火後，硬度值為 693HV，彎斷角度為 37 度，硬度值下降了 30 左右，彎斷角度才微幅上升了 11 度；當碳勢為 0.69% 經 120 秒回火後，硬度值為 680HV，但其彎斷角度卻大幅增加至 133 度。由此可知，較高的爐氣碳勢雖然抵抗回火軟化能力較佳，但隨著回火時間增長，對於韌性的提升卻不顯著；較低的爐氣碳勢雖然在剛開始回火的時候，硬度值會快速地下降，但隨著回火時間的增長，韌性可以大幅的提升。由第 5、6 圖可知，當爐氣碳勢降低時，

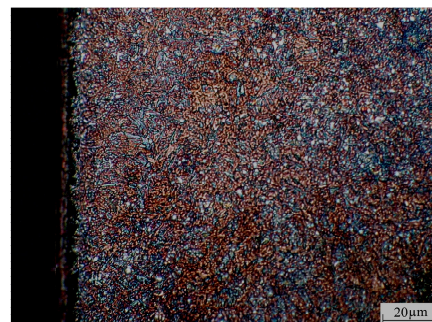
整條回火曲線有漸漸往右下方偏移的趨勢，因為在淬火加熱鋼料的過程中，較高的碳勢會使鋼料發生滲碳反應，使沃斯田鐵溶入較多的碳原子，經淬火冷卻後產生麻田散鐵變態，使晶格發生較大的變形，產生較高的內應力，需較長的回火時間才能消除，因此在碳勢較高的爐氣中加熱鋼料，能夠增加回火軟化之抵抗能力，但是對於韌性的提升效果較小。



(a) C.P.=1.47



(b) C.P.=0.69



(c) C.P.=0.48

Fig. 3. Surface microstructures of high carbon tool steel workpiece after quenching.

為了能夠清楚辨別在何種碳勢的爐氣中加熱淬火回火後，可得到最佳的機械性質，故將各種不同碳勢條件的淬火鋼料，以相同的回火溫度及不同回火時間，將硬度值調整在 670~720HV 之間，並繪成彎斷角度對硬度的分佈圖，所得結果如第 7、8 圖所示。第 7 圖為高碳鋼薄工件在不同碳勢的爐氣中加熱淬火，並經過 330°C 回火後，其硬度與彎斷角度的分佈圖。依

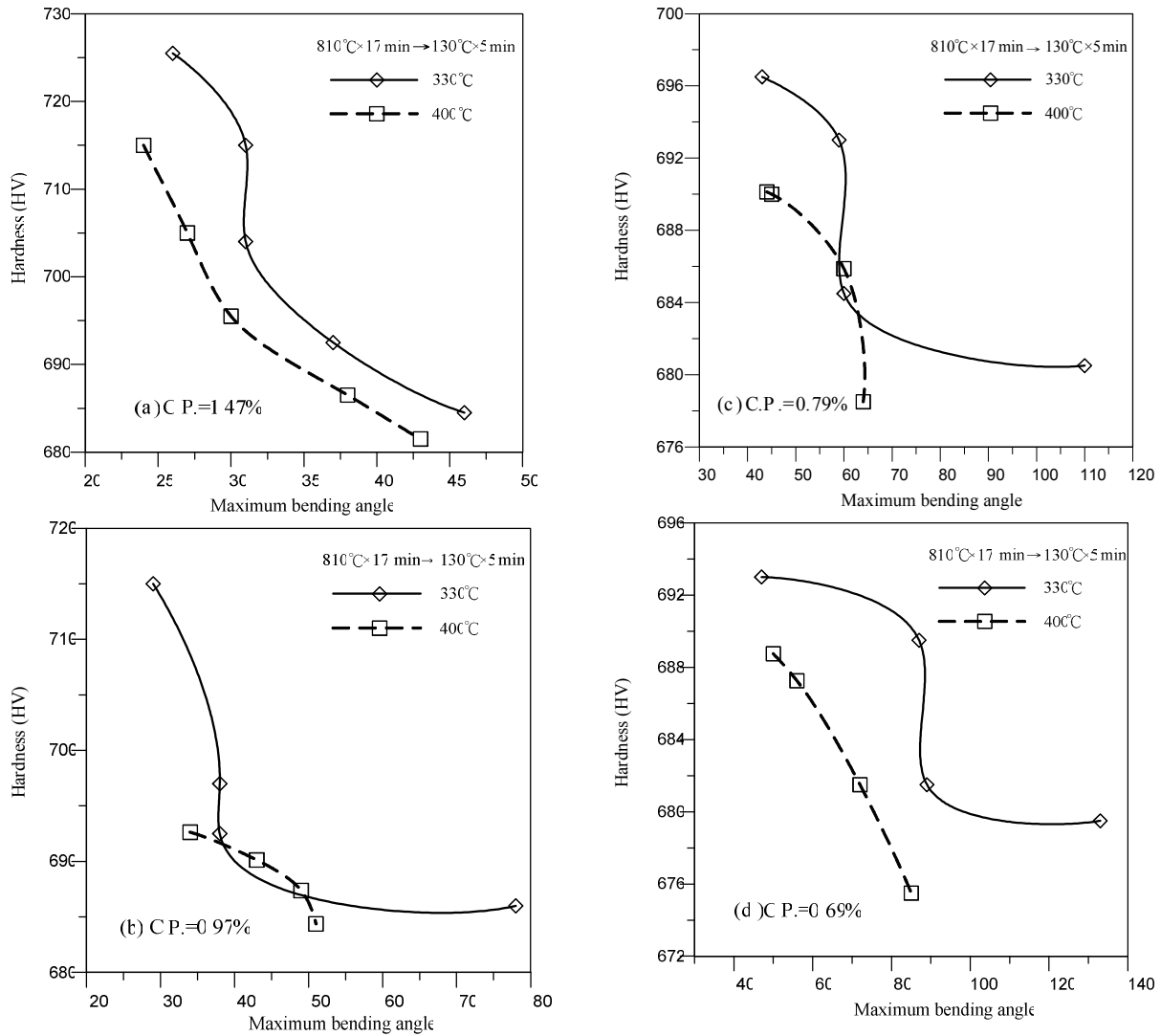


Fig. 4. Surface hardness of high carbon tool steel workpiece quenched and tempered at 330°C and 400°C as a function of maximum bending angle.

硬度值劃分成三個區間，在 680~690HV 之間，當爐氣碳勢為 0.69%，其平均硬度值在 686HV 左右，而彎斷角度為 88 度，相較於其他的碳勢，其硬度值和彎斷角度是最佳的。在爐氣碳勢最高值 1.47% 及最低值 0.48% 的情形下，彎斷角度都是最差的。在 690~700HV 之間，當碳勢為 0.79% 及 0.69%，其平均硬度值在 695HV 左右、彎斷角度為 51 及 47 度，而其餘碳勢在此硬度範圍內，彎斷角度僅有 38 度左右。在 700~720HV 之間，也是碳勢值為 0.69%，其彎斷角度較佳。

第 8 圖為高碳鋼薄工件在不同碳勢的爐氣中加熱淬火，並經過 400°C 回火後，其硬度與彎斷角度的分佈圖。由圖可知，在 675~685HV 之硬度範圍內，爐氣碳勢為 0.69% 時，其平均硬度值在 679HV 左右，而彎斷角度為 79 度，相較於其他碳勢下，其機械性質較佳。在 685~695HV 之硬度範圍內，爐氣碳勢為 0.69%

時，其平均硬度值在 689HV 左右，彎斷角度為 53 度，也是較佳的碳勢條件。

由上述的分析結果，在碳勢過高(1.47%)或過低(0.48%)的情形下，在相同的硬度範圍內來比較其彎斷角度，所得到的韌性都為最不理想，而在一般常用爐氣碳勢 0.69%、0.79%、0.88%、0.97%，在相同的硬度範圍內，隨著碳勢增高，其彎斷角度有隨之降低的趨勢，而在 330°C 及 400°C 的回火溫度下，控制回火時間以調整至相同的硬度，皆可以明顯的看出當爐氣碳勢為 0.69% 或 0.79% 的情況下，所得到的機械性質是最佳的。

### 3.4 回火後的顯微組織

第 9、10 圖是高碳工具鋼薄工件在不同碳勢的爐氣中加熱經淬火後，再進行 330°C 及 400°C 的鹽浴回火處理，以光學顯微鏡觀察到的表層顯微組織。基地為

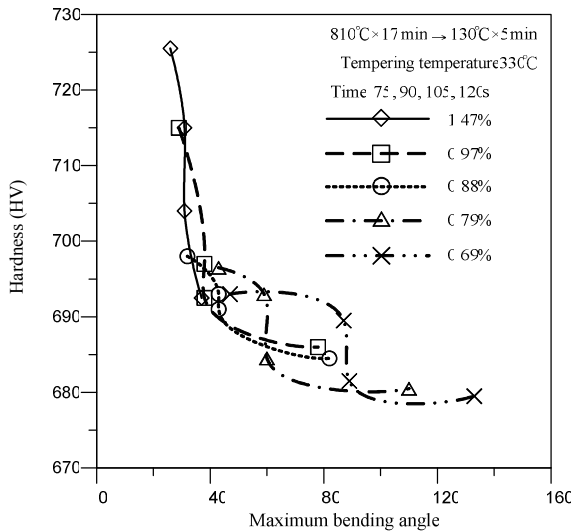


Fig. 5. Surface hardness of high carbon tool steel workpiece quenched and tempered at 330°C for 75~120s as a function of maximum bending angle.

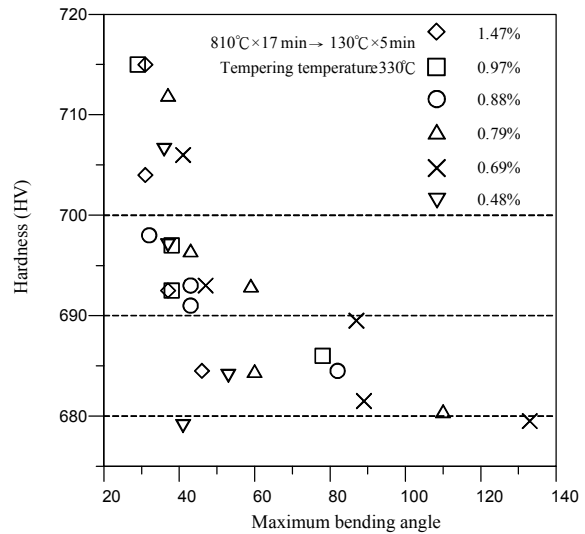


Fig. 7. Surface hardness of high carbon tool steel workpiece quenched and tempered at 330°C as a function of maximum bending angle.

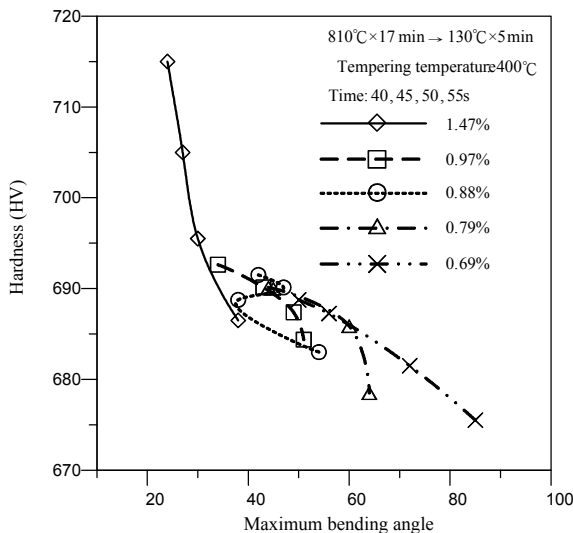


Fig. 6. Surface hardness of high carbon tool steel workpiece quenched and tempered at 400°C for 40~55s as a function of maximum bending angle.

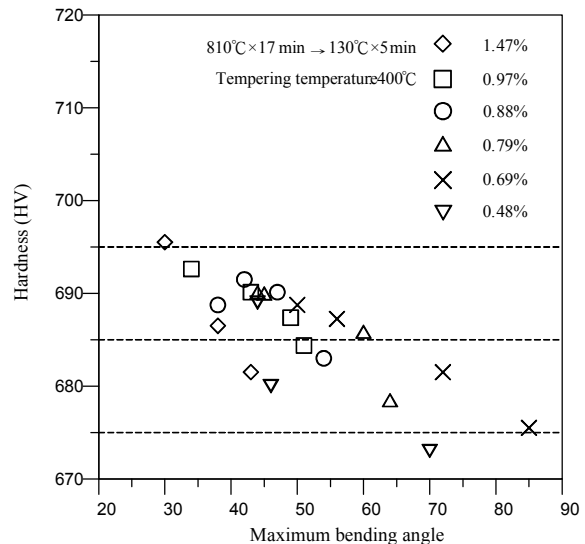


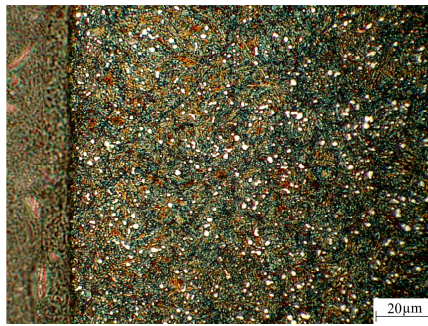
Fig. 8. Surface hardness of high carbon tool steel workpiece quenched and tempered at 400°C as a function of maximum bending angle.

回火麻田散鐵，並散佈著粒狀的碳化物( $Fe_3C$ )，較大的粒狀碳化物推斷為淬火加熱時未固溶於沃斯田鐵中所殘留下來的。雖然回火處理的過程中，殘留沃斯田鐵與高碳麻田散鐵會析出微細的碳化物，但受限於光學顯微鏡倍率及解析度的關係，因此而無法清楚辨別出回火時所析出之碳化物的大小及分佈情形。

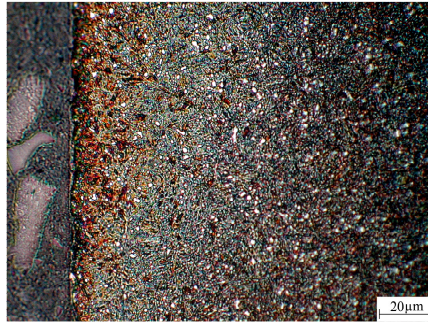
由第 9 圖中可看出，經 330°C 的回火將硬度值調整至 680~690HV，當爐氣碳勢為 1.47% 時，其表層之碳化物分佈的數量最多，皆多於爐氣碳勢為 0.69% 及 0.48% 時。主要有兩種原因，高碳工具鋼薄工件於爐氣碳勢較高的情形下加熱時，沃斯田鐵會發生滲碳，使基地

的含碳量增高，故散佈於基地中的雪明鐵較不易溶入於沃斯田鐵晶粒中，經淬火回火後還是維持原有的狀態。另一個原因是為了使鋼料淬火回火後的硬度值相近，勢必將較高碳勢(1.47%)的回火時間增長，隨著時間的增加，析出的微小碳化物會愈來愈多並漸漸凝聚而粗化，故相較於其他碳勢的爐氣，工件表層所觀察到的碳化物顆粒之數量會較多。

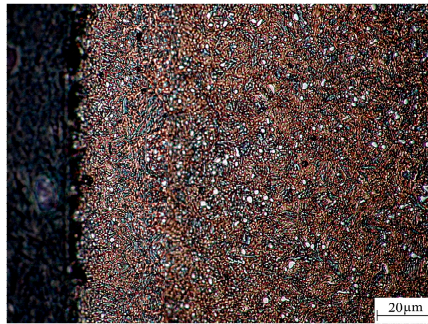
而於 400°C 的回火條件下，由第 10 圖中可知，硬度值在 675~685HV 之間，當爐氣碳勢為 1.47% 時，也可明顯看出其表層散佈較多顆粒狀的碳化物；當爐氣碳勢為 0.48% 時，其碳化物分佈的數量最少。



(a) C.P.=1.47

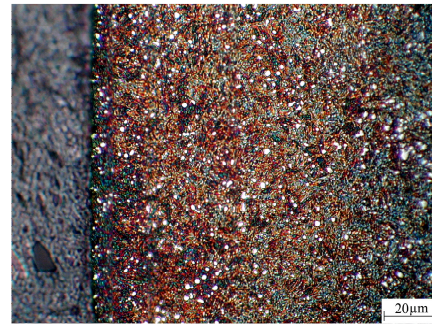


(b) C.P.=0.69

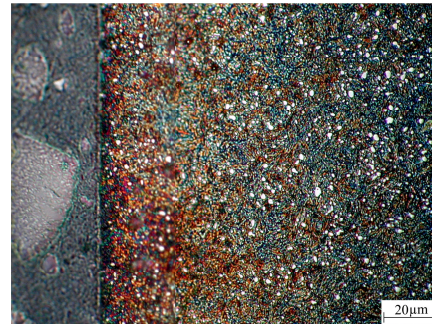


(c) C.P.=0.48

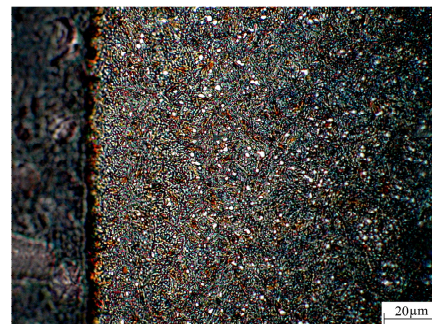
Fig. 9. Surface microstructures of high carbon tool steel workpiece quenched and tempered at 330°C (680~690HV)



(a) C.P.=1.47



(b) C.P.=0.69



(c) C.P.=0.48

Fig.10. Surface microstructures of high carbon tool steel workpiece quenched and tempered at 400°C (675~685HV)

#### 4. 結論

1. 高碳工具鋼薄工件在較高碳勢的爐氣中加熱淬火後，其抵抗回火軟化的能力較佳，但韌性較差。反之，在較低碳勢的爐氣中加熱淬火後，其抵抗回火軟化的能力較差，但韌性較佳。
2. 高碳工具鋼薄工件在各種碳勢的爐氣中加熱淬火，並經 330°C 或 400°C 回火後，在相同的硬度值範圍內，可明顯看出 330°C 回火者，其彎斷角度較大。
3. 高碳工具鋼薄工件在較高碳勢的爐氣中加熱淬火，經回火後表層的顯微組織中有較多顆粒狀的碳化物分佈。
4. 高碳工具鋼薄工件在碳勢 0.70%~0.80% 的爐氣中加熱，經淬火和回火後，可得到最佳的機械性質。

#### 參考文獻

1. 呂璞石、黃振賢，“鋼鐵輝面熱處理〔III〕”，材料科學，第 6 卷，第四期，1974.12，pp.243~263.
2. 劉家銘，“以恆溫熱處理改善高碳工具鋼薄工件的機械性質”，國立台灣大學機械工程學研究所，碩士論文，2004.
3. J. Pietikäinen, “Consideration about tempered martensite embrittlement”, Materials Science and Engineering A273-275, 1999, pp.466-470.
4. Dongyu Liu, Bingzhe Bai, Hongsheng Fang, Wenzheng Zhang, Jialin Gu, Kaidi Chang, “Effect of tempering temperature and carbide free bainite on the mechanical characteristics of a high strength low alloy steel”, Materials Science and Engineering A371, 2004, pp.40-44.
5. A. Ardehali Barani, D. Ponge, D. Raabe, “Refinement of grain boundary carbides in a Si-Cr spring steel by thermomechanical treatment”, Materials Science and Engineering A426, 2006, pp.194-201.
6. 西村富隆，“鋼の低温焼戻し脆性”，熱處理 36 卷 5 号，Vol. 36, No. 5, 1996, pp.287~292